

## 低周波機械振動子とそのメカニカルフィルタへの応用に関する研究

著者	中村 尚
号	438
発行年	1979
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11387">http://hdl.handle.net/10097/11387</a>

氏 名	なかむら ひさし 中 村 尚
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 54 年 4 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 30 年 3 月 山形大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	低周波機械振動子とそのメカニカルフィルタへの応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柴山 乾夫    東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 城戸 健一    東北大学教授 斎藤 秀雄

## 論 文 内 容 要 旨

現在，低周波振動子として主に音さなどが広く用いられているが，その割には音さに関する詳細な解析や関連文献は比較的少く，その設計指針が十分確立されてはいない。本論文は音さ振動子をはじめいくつかの低周波振動子を取りあげ，支持の影響をも含めてその形状，寸法などに対する諸特性を明らかにし設計指針を与えるとともに，低周波用メカニカルフィルタに適する各種振動子およびフィルタ構成の開発，提案および改善を行うもので，これらの結果は低周波振動子の実用化に有用である。

本文では，はじめに低周波機械振動系の解析法の主体となる回路網考察に関する諸関係を明らかにし，ついで音さをはじめ各種の低周波機械振動子について解析および実験的検証を行って，その形状寸法に対する諸特性を明らかにし，さらにその応用として各種のメカニカルフィルタ構成について提案を行う。

### 第 1 章 緒 論

低周波機械振動子とそのメカニカルフィルタへの応用に関する研究の目的と意義ならびに本文の構成について述べた。

## 第2章 横振動細棒の電氣的類推による等価回路網

機械振動系の電氣的回路網によるインピーダンス類推考察について整理して体系化し、本論文で取扱う横振動低周波振動子の解析設計に便利に適用できるよう図表に示した。すなわち(1)横振動細棒の多端子対等価回路網およびイミタンスマトリクス表示、(2)各種端条件下の横振動細棒の駆動点イミタンス表示、(3)共振点展開による等価1端子対回路表示などを行い単一細棒のみならず複合機械系の解析の基礎として便利に利用できるようにした。また(4)各種端条件下の横振動細棒の多端子対回路表示と回路素子値の決定ならびにそのインピーダンスの周波数特性、(5)細棒を純スチフネス系とみなした場合の多端子等価回路、(6)座標変換についての一般的表示などを求め、複合振動系の回路網表示に便を与えた。とくに単一細棒が直交しているような振動系では、各等価回路の接続端子の単なる捻転交さによって容易に接続構成されることを示した。さらに(7)各種端条件の与えられた細棒の任意点の変位速度の表示式を一括して示し、これを用いて細棒および複合機械系の振動姿態を求められるようにした。要するに第2章では横振動細棒の多端子対等価回路表示について詳述し、さらに単一棒を組合せた複合機械系が6端子対等価回路網で表されることを示し、これにもとづいて振動系の共振周波数や振動姿態を容易に導くことができるようにした。

## 第3章 音さ振動子に関する解析およびその特性

低周波用振動子として広く用いられているコ形およびU形音さ振動子について解析を行い、また実験的検証を行って試料の形状・寸法、支持スチフネスなどに対する諸特性を明らかにし設計に対する有用な指針を与えた。

はじめにコ形音さ振動子について等価回路網考察ならびに有限要素法を適用して解析を行い、(1)振動子各部の寸法比に対する共振周波数およびスプリアスとなる反対称モードの共振周波数、(2)支持スチフネスに対する各種モードの共振周波数の変化、(3)音さとくにベース部の振動姿態、(4)接着セラミックの影響などについて計算や実験的検証を行った。それにより(a)コ形音さはアームの厚さの3～4倍以上にすると(i)その共振周波数はアームと同長の片持棒のそれに接近して一定となり、共振尖鋭度 $Q$ も比較的高く保持できる。また(ii)ベース中央を固定しても無支持としても両者の共振周波数はほとんど変らない(長さ比 $\ell_1/\ell > 0.5$ の場合)などの利点がある。(b)アームの実効長 $\ell_1$ はベースからのアーム長 $\ell_0$ とアームの厚さ $d_1$ の $1/2$ との和( $\ell_1 = \ell_0 + d_1/2$ )とすると共振周波数の理論値は測定値とよく一致する。(c)支持スチフネスの大きさによっては対称、反対称の零次モード周波数が対称第1次共振周波数に接近結合してスプリアスとなるので、それを避ける設計が必要となる。(d)ベース部の振動変位分布を明らかにし、音さの支持に対する便を与えた。(e)圧電セラミック長比 $\ell_1/\ell$ を0.5付近にすると対称第2次モードを抑圧でき、またメカニカルフィルタ構成の際などに必要な容量比も小さくできるなどの設計指針が得られた。

U形振動子については運動方程式による解析およびマトリクス法による解析を行って、(5)音さ中央部を固定したときと無支持としたときの寸法比に対する共振周波数(規準定数)を求め、

(6) 支持スチフネスに対する各種モードの共振周波数の変化を明らかにし、(7) 寸法比、支持スチフネスに対する振動姿態を求め、(8) 不平衡構造に対する影響などについて計算ならびに実験的検証を行った。それにより(f) 寸法比  $\ell_a/\ell$  を 0.8 以上にすると固定と無支持との共振周波数がほとんど同じとなり支持の影響が小さくなる。(g) 支持スチフネスの変化にともなう零次モードの周波数が第 1 次共振周波数に接近しスプリアスとなる。(h) 支持スチフネスに対する振動モードの変化を明らかにし、結合共振付近では支持の影響の大きいことを確めた。(i) アーム長の不平衡の影響は比較的大きいが支持位置のずれに対する影響は小さいこと、などが明らかになった。

以上のように第 3 章では、コ形および U 形振動子について寸法比や支持条件に対する諸特性を明らかにして音さの設計に対する有用な指針を与えた。

## 第 4 章 各種低周波機械振動子

音さ以外の低周波振動子として、低周波化に効果のある段付振動子、支持の影響の少ない H 形振動子などを提案し、その解析ならびに実験的検証を行って、振動子の低周波化に役立つ指針を与えた。

(1) 一端段付音片、(2) 両端段付音片、(3) 段付片持棒などの段付振動子については、これを分布定数系とみなして等価回路網解析を行い、段付寸法比に対する周波数降下度、振動モードの変化などを明らかにした。その結果、(a) 一端段付音片では、段付長さ比の小さい範囲( $\ell_2/\ell < 0.2$ )では、厚さ方向段付と幅方向段付は同じ断面比の場合、周波数降下の割合はほとんど同じであること。(b) 効果的な段付比は一端段付では  $\ell_2/\ell \div 0.2$ 、両端段付では 0.1、段付片持棒では 0.2 程度であることなどを確め、さらに一端段付音片に関する解析結果を利用して、片持棒の固定条件について検討し、支持部質量に対する周波数変化を明らかにした。

その他、支持の影響の小さい H 形振動子、力係数が大きくて製作の容易な円板音さなどを提案し、メカニカルフィルタへの応用の期待できることを示した。

## 第 5 章 メカニカルフィルタへの応用

各種の低周波振動子を用いた結合子形、差動接続形、双共振子形メカニカルフィルタ(MF と略称)構成を行って実用に供し得る MF 特性を得た。

コ形、U 形音さを用いた結合子形音さ MF は特性の等しい 2 対の音さを結合子で結合し、3 素子 T 形 MF 構成したもので、構造簡単で結合子の接着位置を変えることによって周波数調整も容易にできるなどの利点があり、現在広く実用に供されている。ここでは、(1) コ形音さを用いて比帯域幅  $B = 0.2\%$  の狭帯域 MF を得、さらにまた(2) ノルトン変換を利用して外部インダクタンス、終端インピーダンスの低減をはかり、比帯域幅  $B = 5.7\%$  の MF 特性を得た。また、2 個の振動子を電氣的に差動接続して MF 構成を行う例としては、(3)  $B_{00}$  モードの円板音さ 2 個を用い、その大きい力係数を活用して約 17% の広帯域 MF 特性を得ることができた。さらに振動子 1 個による双共振 MF 構成を試み、実用に供し得る特性を得た。この構成は小形化に有効で、また温度特性を等しくできるなどの利点がある。ここでは(4) コ形音さの対角線モード利用および

(5) 円板音さ  $B_{01}$  直交モード利用の双共振MF構成を行ったもので、前者は、アーム断面辺比を変えて周波数を調整し、さらに陵辺面取りによってモードの安定化と周波数微調整をはかることができる。(  $f_0 = 5.25 \text{ KHz}$ ,  $B = 5\%$  ) これはコ形音さの面垂直逆相モード、面内対称モード利用のMFに比してセラミックの数が少くてすむ。また後者については  $B_{01}$  の同種モードが直交するようにセラミックを分割接着し、一方のモードのアーム端に相当する円周部を切りおとすことによって縮退モードを分離し、モードの安定化と周波数調整をはかることができる。(  $f_0 = 2.42 \text{ KHz}$ ,  $B = 2.05\%$  ) (6) さきに提案された低周波用H形剛体振動子は単共振利用のため狭帯域であり、温度特性などが不安定であった。これを結合子形MF構成として広帯域特性を与え安定化をはかることを提案した。(  $f_0 = 750 \text{ Hz}$ ,  $B = 6\%$  ) また、等価回路解析によって、与えられた組わく面積内で最低周波数となるような最小寸法設計を明らかにした。(7) わく形振動子は、寸法比によって対称モードと反対称モードの周波数が接近することに着目し、双共振MF構成を試みた。わくの間に連結子を設け、その位置調整によって容易に周波数が調整できる。ここでは、わく形片持棒、わく形音片などを用いた二、三の構成例を示し実用化の期待できることを示した。

以上のように、第5章では小形化、低周波化および構成の容易さの観点から、新しい振動子や利用モードの開発を主として実験的検討を行ったものである。

## 第6章 結 論

各章で得られた成果をまとめて本論文の結論とした。要するに音さをはじめ各種低周波振動子について今まで明らかにされていなかった諸寸法や支持スチフネスとの関連における共振周波数や振動姿態などの特性を明らかにし、また低周波用MFとしての利用に適する各種振動子ならびにMF構成を開発、提案し、あるいは有効な改善を行った。これらの結果は、低周波振動子および低周波用MFの設計に対して有用な指針を与え、またそれらの実用化に際して役立つものである。

## 審 査 結 果 の 要 旨

低周波振動子の代表的なものとして古くより音さが用いられている。しかるにその詳細な解析は比較的少なく、音さ応用機器の設計指針を与えるには不十分であった。

本論文は、音さを主体とした低周波振動子を取りあげ、支持の影響を含めて、その形状、寸法などに対する振動諸特性を明らかにし、さらにこれをメカニカルフィルタに適用して、いくつかの新しい構成法を提案したもので、全編6章より成る。

第1章は緒論である。第2章では、横振動細棒に対する電気回路網類推による解析法により、駆動点イミタンス、振動姿態、細棒の分布質量を無視出来るような純スチフネス系などの諸特性を明らかにしている。その表式は著者の提案したH関数、F関数を用いて体系化されており、次章以下にのべる複合系解析の基礎となっている。

第3章では、低周波振動子として広く用いられている、コの字形およびU字形音さ振動子の挙動を電気回路網的手法によって解析している。またその結果を、運動方程式を解いた結果、有限要素法を用いて解析した結果、および実験の結果と対比して詳細に検討している。

とくにコの字形音さに電気回路網類推手法を適用する場合には、アームそのものの長さ $\ell_0$ の代りに、アームの厚さ $d_1$ の影響を含めた、 $\ell_1 (= \ell_0 + d_1/2)$ を実効長として用いることにより、共振周波数の理論値は実験値とよく一致することを見出している。

また、支持が振動モードや共振周波数などに及ぼす影響を支持スチフネスを用いて定量的に検討している。これらは重要な知見である。

第4章では低周波振動子として有用な、段付振動子ならびに著者の提案になる支持の影響の少ないH形振動子などについて解析ならびに実験的検証を行っている。

第5章では、以上の各種振動子を用いて構成したメカニカルフィルタの設計法について理論的、実験的に詳細な検討を行っている。とくに、コの字形あるいはU字形音さ2個を結合子で結合して構成した“3素子T形メカニカルフィルタ”は構造が簡単であるうえ、結合子の接着位置を変えることによって周波数調整も容易に行えるなどの利点があることを明らかにしている。これらは実用的に貴重な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は音さをはじめとする各種低周波振動子について、振動の諸特性を解明し、これらを用いた新しい低周波メカニカルフィルタを提案するなど、いくつかのすぐれた知見を加えたもので、電気音響工学ならびに通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。